

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIA TEADUSKOND
Tehnoloogia Instituut

Dmitri Grištšenko

**MATERJALITEHNOLOOGIA PROJEKTI
„SOFTSENS“ SENSORTALLA
KOMMUNIKATSIOONIMOODULI LOOMINE**

Bakalaurusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Tarmo Tamm, Ph.D

Luban töö kaitsmisele:

Juhendaja

Programmijuht

allkiri, kuupäev

Tartu 2014

Sisukord

Tähised, lühendid ja definitsioonid.....	3
Sissejuhatus.....	5
Töö eesmärk.....	7
Valdkonna ülevaade.....	7
Pedobarograafia.....	7
Labajala rõhujaotust mõõtvad seadmed.....	9
Raadioside standardid.....	12
Bluetooth.....	13
Bluetoothi ajalugu.....	13
Bluetooth klasside võrdlus.....	14
ANT.....	14
Bluetooth LE ja ANT+ võrdlus.....	14
Tehniline võrdlus.....	14
Äripoolne analüüs.....	16
Ülevaade erinevatest akutüüpidest.....	16
Liitiumioonakud.....	16
Liitiumraudfosfaatakud.....	17
Liitiumpolümeerakud.....	17
Riistvara Projekteerimine.....	18
Nõuded loodavale kommunikatsioonimoodulile.....	18
Vooluallika valik.....	19
Ülevaade erinevatest Bluetooth kiipidest.....	20
Nordic semiconductor NRF51822.....	21
Texas Instruments CC2564.....	21
Bluetooth integraallülituse valik ja põhjendus.....	22
Bluetooth integraallülituse elektroonikaga liidestamine.....	23
Tarkvara arendamine.....	25
Tarkvaraarenduse tööriistad.....	25
NRF51822.....	25
• Android.....	26
Bluetooth mooduli tarkvara.....	26
Android.....	28
Katsed ning tulemused.....	30
Bluetooth levi ja paketikadu.....	30
Voolutarve.....	33
Kokkuvõte.....	36
Summary.....	37
Kasutatud kirjandus.....	38
Lisad.....	42

Tähised, lühendid ja definitsioonid

MCU (inglise keeles Microcontroller Unit) - Mikrokontroller

GATT profile (inglise keeles Generic Attribute profile) - Bluetooth andmevahetuse raamistik

RS-232 UART (inglise keeles universal asynchronous receiver/transmitter) - Telekommunikatsioonis andmevahetuse jadasuhtluse standard. Levinud mikrokontrollerites kahe juhtme (RxD ehk Received Data ja TxD ehk Transmitted Data) siin. Sünkroonset variatsiooni lühendakse kui USART ja selleks lisandub mikrokontrollerites kaks juhet: CTS ehk Clear To Send ja RTS ehk Ready To Send.

SoC (inglise keeles System on Chip) - Tõlkes süsteem kiibis. SoC on integreeritud elektroonikaskeem, mis kaasab kõiki arvuti või muu elektroonilise süsteemi komponente ühte kiipi.

SPI (inglise keeles Serial Peripheral Interface) - Tõlkes perifeerne jadaliides. See on sünkroonne elektroonikakomponentide vaheline andmeside siin, mis sai nime firmalt Motorola ning sai tunnustatud standardiks elektroonikas.

I2C (inglise keeles inter-integrated circuit) - I2C on mitme võimaliku ülemaga jadasiin, mida arendas välja Phillips. Seda siini kasutakse madala kiirusega perifeeria seadmete ühendamisel emaplaatidega, manussüsteemidega või muude seadmetega.

Bluetooth Stack - Bluetooth Stackiks nimetakse Bluetooth protokolle realiseerivat riistvaraspetsiifilist tarkvara, mis tõlgendab võõrustava kontrolleri(manussüsteemide puhul mikrokontrolleri) poolt saadetud käske ning juhib Bluetooth transiiveri riistvara. Mikrokontrolleri Bluetooth rakenduse puhul on Bluetooth Stack paigaldatud mikrokontrolleri tarkvaraga paralleelselt selleks eraldatud mäluruumis.

JTAG (inglise keeles Joint Test Action Group) - JTAG on mikrokontrollerites väga levinud silumise siin, mis on toetatud enamustes tänapäeva protsessorites kui neil on selleks piisavalt viike.

SWD (inglise keeles Serial Wire Debug) - SWD on kaheviiguline alternatiiv JTAG

siinile. Paljud mikrokontrollerid võimaldavad selle siini kaudu programmi seadmele üleslaadimist ning selle silumist.

HCI (inglise keeles Host Controller Interface) - Bluetooth puhul on HCI Bluetooth *stacki* ja mikrokontrolleri tarkvara vahelise suhtlemise standard. See standard võimaldab mikrokontrolleril lülituda Bluetooth *stacki* ja kontrolleri tarkvara vahel minimaalse kohandamisega.

SDK (inglise keeles Software Development Kit) - Tõlkes tarkvaraarenduse tööriistakomplekt. SDK tööriistad lihtsustavad erinevatele platvormidele tarkvara kirjutamist, pakkudes platvormispetsiifilisi teke ja programmeerimisliideseid.

Sissejuhatus

Üheks peamiseks tehnoloogia rakendusala on alati olnud meditsiin. Kõige silmapaistvad meditsiinitehnoloogia rakendused on keemilised – paljud uued ained ja nende segud katsetakse rakultuuridel ja bakteritel, otsides positiivseid mõjusid, mis oleksid inimestele kasulikud. Samuti üritatakse keha puudujääke parandada invasiivsetel meetoditel, tehes kehaorganite muudatusi kirurgilisel teel. Selline otsene lähtumine tervise parandamisele ei ole aga alati võimalik – tehnoloogia pole maagia, millega saaks parandada ükskõik millist füsioloogilist probleemi, ilma et patsient ei peaks ise selleks vaeva nägema. Selline arusaam on diagnoositehnika aluseks, millele järgnevad patsiendi poolt teadlikud pingutused probleemi lahendamiseks.

Üks diagnoositehnikast väljakujunenud suundadest on inimese keha füsioloogia ja liikumise analüüs ning korrigeerimine. Keha vigastuste vältimiseks üritatakse kiiresti tuvastada füsioloogilisi hälbeid ning vastavalt kohandada inimese elustiili, et vältida uusi vigastusi ning haigusi. Näiteks jalahälvetest tulenevate probleemide diagnoosimiseks, vältimiseks ning nende taastusravis rakendatakse pedobarograafilisi ehk labajala rõhujaotust mõõtvaid seadmeid, mille mõõtmistulemuste kaudu saab arst diagnoosida labajala hälbeid ning sportlased saavad vältida valest liikumistehnikast tulenevaid vigastusi.

Pedobarograafiliseid seadmeid on turul mitmel erineval kujul: rõhuanduritega kaetud matid, rajad, tallad ning muud jalaalused. Nende seadmete mõõtmistulemuste analüüsimiseks on tavaliselt toote komplektis ka analüüsiv tarkvara, mis tõlgendab elektroonika kommunikatsioonist saadud andmeid kasutajale loetavale kujule ning koostab statistikat. Sellised seadmed on nii meditsiiniteaduse professionaalide kui ka spordiharrastajate seas väga hinnatud, kuigi paljudel praegu turul olevatel lahendustel on puudujääke, mis vähendavad nende seadmete efektiivsust. Mõned suuremad probleemid on seotud seadme statsionaarsusega või selle kaasaskantavaks tegemise lahendusega.

Kantavad andurid pole füsioteraapia vallas uudne mõte. Juba aastakümneid on arendatud seadmeid, mis võimaldavad kõrgtehnoloogia abiga uurida inimkeha füsioloogiat, tuvastada selle võimeid ja piire, ning aidata inimestel oma tervist parandada. Selliste seadmete suure täpsuse ja turvalisuse nõuded vajavad alati kõige uuema tehnoloogia rakendamist. Suured, ohtlikud ja ebaefektiivsed komponendid asendatakse pidevalt uuemate, väiksemate, ohutumate ja efektiivsematega. Samuti üritatakse teha sellist elukvaliteeti tõstvat tehnoloogiat tavatarbijale kättesaadavamaks, valmistades optimeeritud, odavamaid versioone ja laiendades nende kasutajate ringi.

Üks suurematest probleemidest kantavate andurseadmete puhul on andmesidesüsteemi loomine nii, et see ei takistaks ei seadme, ega selle kasutaja tööd. Väiksemate vahemaade puhul on juhtmete asemel kasutatavad erinevat tüüpi elektroonikalülitusi: jäigad klaasfiibrilehtedest plaadid [1], õhukesel ja paindlikul polümeerlehel elektroonikalülitused [2] ja elastsel silikoonkihil niinimetatud “elektrooniline nahk” [3]. Pikemate vahemaade puhul on selliste elektroonikalülituste kasutamine äärmiselt ebapraktiline – sel juhul tuleb kasuks raadiotehnika.

Viimasel aastakümnel on raadiotehnika palju arenenud. Suured, energianõudlikud raadiosaatjaskeemid [4] on asendatud tänapäevaks väikeste, vähem kui ruutsentimeetrise pindalaga kiipidega [5]. Lisaks suurusele on muutunud ka raadiotehnika tööpõhimõte ja lisandunud on protokollid, millel on funktsionaalsust mõjutavad eripärad - rakendustes, kus on tähtsad suur raadiolevi ulatus ning turvalisus, kasutakse võimsamat riistvara ning keerulisemaid suhtlusprotokolle kui rakendustes, kus tähtsam on väike voolutarve ning kasutamismugavus.

Töö eesmärk

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on välja selgitada rõhutundliku sensortalla jaoks optimaalne kommunikatsioonimoodul ja vooluallikas, valmistada kommunikatsioonimooduli prototüüp, seda karakteriseerida ja teisendada sensoritelt saadav signaal inimesele arusaadavale visuaalsele kujule. Kogu sensortalla projekti põhinoeteks on piisav mõõtetäpsus, kõrge mõõtmisagedus, kasutamismugavus, vastupidavus väliskeskkonna mõjudele, töökindel andmeside ning maratoniks piisav vooluallika kestvus.

Valdkonna ülevaade

Pedobarograafia

Pedobarograafia ehk jalarõhutehnika on diagnoositehnika suund, mis tegeleb labajala rõhutsoonide uurimisega. Seda teadusala kasutakse kõnnaku ning kehaseisangu uurimises, mille tulemused leiavad rakendust robootikas, kohtuekspertiisis, meditsiinis ning spordiuuringutes. Robootikas on need teadmised tähtsad kui üritatakse imiteerida inimese või looma liikumist. Kohtuekspertiisides annavad jalarõhust jäetud jäljed vihjeid sündmuspaigal viibijatest - jälje suurus vihjab viibija soole, rõhujaotus tema seisakule, tegevusele ning mõnel juhul ka tervisele ning jälgede vaheline kaugus annab tugeva vihje nende omaniku pikkuse kohta. Meditsiinis ja spordiuuringutes on pedobarograafia aga rohkem kui uurimismeetod - see võimaldab õige diagnoosi kaudu inimese elu parandada, korrigeerida kehahoidu, vältida vigastusi ning parandada sportlaste tulemusi.



Pilt 1: Kõnnaku analüüs Mercy meditsiinikeskuses, Baltimore, USA,[6]

Labajalaga seotud hälbe õigeaegne diagnoos võib vältida edaspidiseid vigastusi. Näiteks lampjala hälbe puhul on tähtis, et rõhk labajala keskosale oleks minimaalne – vastasel juhul tekitab igasugune jalgadel liikumine suurt valu ja põlveliigese ning selgroo pörutamise teel täiendavat vigastamise ohtu. Selleks, et neid vigastusi vältida, peab lampjalgsuse põdeja vältima jooksmist ning raskuste kandmist, soovitatav on pöördudakorrigeeriva teraapia jaoks arsti poole. Eriti ohtlik on aga lampjalgsus diabeetikute puhul – kuna nende tundlikus on nõrgendatud, siis võivad nad lampjalgsuse probleemi ja selle ohtusid mitte märgata [7].

Lampjala diagnoosimine on üsna kerge – see on visuaalselt ja tekitatud valu tõttu kergesti märgatav ning krooniline. Mittekrooniliste ja mittevaluliste probleemide märkamine on aga väga raske, kuid potentsiaalselt võivad niisugused probleemid olla sama kahjulikud. Näiteks tekib üks väga levinud labajala vale rõhujaotuse probleem ebaõigejooksmistehnika tõttu. Nagu sportlastele tänapäeval ka õpetatakse, peab õige jooksmise ajal olema rõhk suunatud varvastele või talla keskosale – nii pehmentatakse samme ja vähendatakse sääreлуу, põlvede ja selgroo pörutamist. Paljud ilma väljaõpetuseta amatöörspordlased jooksevad aga kand ees, mis on kõval

pinnasel ning juba olemasolevate selja- või põlvehaiguste puhul eriti ohtlik [8]. Selliste probleemide diagnoosimiseks visuaalsest analüüsist tihti ei piisa ning seepärast kasutakse selleks, eriti professionaalide puhul, elektroonilisi andureid ning analüüsivat tarkvara.

Labajala rõhujaotust mõõtvad seadmed

Esimesed dokumenteeritud labajala rõhujaotuse uuringud publitseeriti 1882. aastal, kus jalajälje „salvestamiseks“ kasutati kummi ja tinti [9]. Jäljest on võimalik visuaalse vaatluse kaudu tuletada rõhujaotuse relatiivsed erinevused, kuid ilma konkreetsete numbriteta on see mõõtmisviis üsna ebatäpne. Sarnane uurimisviis on tänapäevani kasutusel kohtuekspertiisi uuringutes, kus kummi ja tindi asemel on tavaliselt mulla sisse ja mullaga kõvema pinnasele jäetud jäljed. Alles siis kui personaalarvutid muutusid tavatarbijale kasutatavaks, hakati välja arendama elektroonilisi aparate, mis muutsid rõhujaotuse uurimise kliinilises keskkonnas praktiliseks.

Pedobarograafilised seadmed jagunevad peamiselt kahte kategooriasse: põrandapõhised ning jalatsisisesed. Tehnoloogia, millel need seadmed põhinevad on mitmekesine, ulatudes piezoelektriliste andurite maatriksitest kuni valguse murdumist püüdva tehnikani [10]. Enamuse seadmete lõpptulemuste sihitav väljund on kahedimensionaalne pilt või labajala rõhujaotuse ajalisest kulgemisest piltide kogum, mis on tihti nimetatud ka rõhukaardiks.

Füsioteraapiakeskustes, kinesioloogia laborites ning muudes teadusmeditsiinilistes kohtades võib kohata matte, mis mõõdavad labajala rõhujaotust. Üks näide levinud ja tüüpilisest rõhumatist on ettevõtte Tekscan poolt renditud MatScan süsteem. MatScan on 435,9 x 368,8 mm suurune, takistuslikel rõhuanduritel põhinev 0.57 cm paksune matt, mis suudab teha 100 jala rõhumõõtmist sekundis ning edastada tulemused spetsiaalsesse analüüsimisprogrammi. MatScani andurite tihedus on 1,4 andurit ruutsentimeetri kohta [11]. Analoogilised matid ja rajad on veel: Sensor Products Go-tec, Novel emed seadmete seeria, AMcube footwork matid ja rajad ning Zebris FDM [12-15]. Need tooted on väga sobilikud testide jaoks laboritingimustes ,

kuid nagu teisedki statsionaarsed süsteemid - reaalses treeningutingimustes mittekasutatav. Realistlikus olukorras tulemuste saamiseks on vaja, et mõõtmisseade oleks kantav, ei takistaks täieliku treeningusessiooni läbiviimist ning oleks välismõjudele vastupidav.

2000. aastate algusest hakkasid turule ilmuma esimesed elektroonilised sisetalla pedobaromeetrid. *Biofoot*, üks esimestest sellistest seadmetest, on 2001. aastal Hispaanias arendatud ja müügile tulnud jalatsi sisetallana vormistatud andur ning hea näide kantavast andurist, mille suhteliselt aegunud kommunikatsioonimooduli tehnika takistab sihipärast kasutamist.. Antud toode koosneb kahest 0.7 millimeetri paksusest polüestrist sisetallast, mille sees on 64 piesoelektrilist andurit, mis võimaldavad mõõta talla tasapinnalist rõhujaotust. Sisetallad on ühendatud võimenditega, mis on rihmadega ümber pahkluude kinnitatud. Võimendid edastavad mõõtmistulemused kaablite kaudu saatjamoodulile, mis on kinnitatud ümber kasutaja vöö.[16]

Valencia Biomehhaanika instituudis on tehtud *Biofoot* kohta uuring [17], mille eesmärgiks oli selgitada seadme terviseohte ja kohandada seda kaugushüppes kasutamiseks. Uuring näitas, et antud sensortallal on mitu probleemi, mis on enamasti seotud kommunikatsioonimooduli ehitusega ja selle paljude komponentide asukohaga inimkeha lähedal. Kasutaja keha külge kaitseta paigutatud suuremõõtelised elektroonikakomponendid olid kergesti väliskeskkonna poolt kahjustatavad ja kaablite mitteelastsus võis põhjustada seadme riknemist või kasutaja tervise kahjustamist. Samuti segasid juhtmed hüppajal õige hüppeasendi võtmist ja hüppe ajal käte positsioneerimist, mis mõjutas ka treeningu tulemusi. Kaugushüppes kasutamiseks tehtud kohandused olid enamasti seotud elektroonika kaitsemisega ning kõrgema kvaliteetiga, elastsemate juhtmete kasutamisega. Need kohandused aga ei likvideerinud riske täielikult, vaid ainult vähendasid nende tõenäosust.

Üks kaasaegsematest tallasisestest labajala rõhumõõtja seadmetest on saksa firma Moticon poolt arendatud OpenGo. See seade koosneb kolmeteistkümnest mahtuvuslikust rõhuandurist, 3D kiirendussensorist ning temperatuurisensorist.

Samuti on tallas sisseehitatud puhvermälu ning ANT+ raadiosuhtlust võimaldav riistvara. Kogu see elektroonika on sisseehitatud mitmekihilisse talda, mis sisaldab andurite kihti, dielektrilist kihti ning ümarakujulist elektroonikamoodulit. Seadme vooluallikaks on nööpelement, mida võib talla-alumise korgiga kaetud ava kaudu vahetada [18]. OpenGo oli algselt mõeldud suusatamise uuringute jaoks, kuid nüüd reklaamitakse seda kui iga spordiala tarbeks sobivat seadet. Selle seadme silmapaistvamad nõrgemad küljed on selle keskpärane andurite tihedus ning raadioside standardi valik, mis ei ole nutiseadmetes kuigi levinud. Küll ei ole aga veel avalikustatud kõiki seadme tehnilisi parameetreid, sest OpenGo on veel uus toode, see ei ole avalikult veel müügil ja kolmanda osapoole uuringuid pole veel jõutud teha - need probleemid on enamusel uutest sisetalla pedobarograafidest.



Pilt 2: Moticon OpenGo sensortald

Raadioside standardid

Maailmas on välja arenenud mitmed erinevad juhtmeta kommunikatsiooni meetodid, mis leiavad rakendust erinevate nõuetega valdkondades. Need tehnoloogiad jaotuvad nelja kategooriasse, mis põhinevad erinevatel rakenduseladel ning andmeedastusulatustel. Need kategooriad on väiksemast ulatusest suuremani inglise keeles: *Personal Area Network* (PAN), *Local Area Network* (LAN), *Metropolitan Area Network* (MAN) ning *Wide Area Network* (WAN) [19]. Nende kategooriate erinevused ning kasutuselad on väljatoodud tabelis 1.

Tabel 1: Raadioside kategooriad

	PAN	LAN	MAN	WAN
Standardid	Bluetooth, ANT, ZigBee	802.11, HiperLAN2	802.11, MMDS, LMDS, WiMAX(802.16)	GSM, GPRS, CDMA, HSDPA, 2.5G, 3G, 3.5G
Andmeedastus kiirus	Kuni 1Mbps	11 kuni 54 Mbps	11 kuni 100+ Mbps	kuni 7.2 Mbps
Signaaliulatus	Väike (ilma võimendavate antennideta vaid paar meetrit)	Keskmine (üldiselt ühe ruumi ulatuses)	Keskmine kuni suur (kuni ühe hoone ulatuses)	Suur (ühendab linnad, riigid ja isegi kontinendid)
Rakenduselad	Üksikute seadmete vaheline suhtlus, telefonid	Ettevõttesisesed võrgud	Internetiga metropoliite ühendavad võrgud	Mobiiltelefonide võrgustikud

Kaasaskantavate seadmete vahelise suhtluse jaoks on kõige optimaalsem kasutada PAN standardeid, sest need ei vaja palju riistvara, ei nõua palju elektrivoolu ning väikese võimsuse tõttu ei kujuta kasutajale ohtu. Mõned näited PAN standarditest on Bluetooth, ANT ja ZigBee. ZigBee on tänapäeval selle nõrgema voolutarbe efektiivsuse ja sageduskanalite kokkupõrgete vältimise süsteemi tõttu palju vähem levinud kui esimesed kaks standardit. Seega on antud bakalaureusetöös uurimiseks väljavalitud Bluetooth ja ANT viimased iteratsioonid - Bluetooth LE ja ANT+.

Bluetooth

Bluetooth ehk sinihammas on IEEE 802.15.1 tehnoloogiale vastav tööstusstandard seadmete omavaheliseks traadita suhtlemiseks (WPAN). Sinihammas on liides, mille abil suudavad erinevad seadmed nagu mobiiltelefonid, PDA-d, arvutid või perifeeria-seadmed omavahel suhelda. Sinihamba põhieesmärgiks on andmeedastuste ja juhtmeühenduste asendamine. Esimese osa sinihamba traadita tehnoloogiast töötasid välja Hollandi professor Jaap Haartsen ja rootslane Sven Mattisson., kes töötasid tol ajal Ericssonis[20].

Bluetoothi ajalugu

Bluetooth kui juhtmeta kommunikatsiooni standard sai alguse Rootsi telekommunikatsiooni tehnoloogia firmast Ericsson, aastal 1994. Aastal 1998 rajati Bluetooth Special Interest Group (SIG) ühing viiest firmast: Ericsson, Intel, Nokia, Toshiba ja IBM. SIG eesmärgiks oli ühendada oma tooteid Bluetooth tehnoloogia abil ning tehnoloogiat koos edasi arendada. Samal aastal sai ka Bluetooth oma praeguse nime, mis valiti 10. sajandil elanud Taani viikingite kuninga Harald Blåtand (tõlkes „Sinihammas“) järgi.

Järgmisel aastal tuli välja Bluetooth-i esimene iteratsioon – versioon 1.0. COMDEX arvutite ekspositsioonil oli see tehnoloogia väga edukas ning võitis “Parim tehnoloogia *show*” tiitli. Järgnevatel aastatel jätkus Bluetooth rakenduste kiire areng ning turule hakkas ilmuma üha rohkem erinevaid Bluetooth-i kasutavaid seadmeid. - telefonid, personaalarvuti kaardid, kõrvaklapid, printerid, sülearvutid, digitaalsed kaamerad ning teised [22].

Bluetooth klasside võrdlus

Tabel 2: Bluetooth seadmete klassid[21]

Klass	Maks. võimsus	Maks. võimsus	Ulatus õues
Klass 1	100 mW	20 dBm	100 m
Klass 2	2,5 mW	4 dBm	10 m
Klass 3	1 mW	0 dBm	1 m

Seadmete tegelik ulatus sõltub nende saatevõimsusest ja märgatavalt ka paljudest teistest erinevatest parameetritest. Siia hulka kuuluvad vastuvõtja antenni kuju ja ümbruskonna omadused, mis võivad signaali erinevalt mõjutada. Näiteks paksud seinad kujutavad endast suurt takistust andmete saatmisel. Andmete paketid ja nende erinevad suurused ja kaitseprotokollid võivad samuti maksimaalset vahemaad saatja ja saaja vahel muuta.

ANT

ANT on 2003. aastal Kanada ettevõtte Dynastream Innovations Inc. osakonna ANT Wireless poolt väljaarendatud ning turustatud traadita PAN tehnoloogia. Aasta hiljem tuli välja ANT-i uus väikese võimsusega iteratsioon ANT+. 2005. aastal tulid turule esimesed ANT transiiverkiibid, Nordic Semiconductori nRF24AP1 [23]. Mobiiltelefonide turule jõudis ANT alles 2011. aastal, kui ANT toetajate liiduga liitus Sony Ericsson ja turule jõudsid esimesed ANT ühendusega nutitelefoniid Xperia arc, Xperia X8, Xperia X10 mini, ja Xperia X10 mini pro [24].

Bluetooth LE ja ANT+ võrdlus

Tehniline võrdlus

Bluetooth LE, mis on tihti kutsutud Bluetooth Smart, ja ANT+ on mõlemad väikese võimsusega juhtmeta ühenduvuse tehnoloogiad, mis on peamiselt mõeldud spordi ja meditsiini rakenduste jaoks, kuigi Bluetooth esimesed iteratsioonid olid algul mõeldud jadaliidese kaablite asendusena. Mõlemad tehnoloogiad kasutavad 2,4 GHz

sagedusala ning rakendavad sarnaseid meetodeid energia säästmiseks – andmeedastus toimub väga lühikeste impulssidega üle pikema perioodi ning passiivses olekus läheb seade väga väikese voolutarbega “puhkeolekusse” (inglise keeles *sleep mode*). Andmeedastuskiirus on nii ANT+ kui ka Bluetooth LE-l 1 Mbit/s, mille saavutamiseks rakendatakse *Gaussian frequency-shift keying* (GFSK) ehk Gauss-i sagedusnihe modulatsiooni meetodit. Signaalihäirete vältimiseks rakendavad mõlemad protokollid adaptiivset sageduse muutmise tehnikat [25].

Kõige suuremad erinevused Bluetooth LE ja ANT+ vahel on nende suhtlusprotokollides. Bluetooth LE rakendab hulga erinevaid sisemisi suhtlusprotokolle – koos nimetakse neid *Bluetooth protocol Stack*-ks. ANT-i suhtlus toimub aga ühe lihtsama *ANT Message* protokollu kaudu [26]. Protokollid dikteerivad rakenduse võimalikku topoloogia. Kuna Bluetooth LE protokollid nõuavad, et iga alamseade (inglise keeles *slave device*) saab olla korraga ühenduses ainult ühe ülemseadmega (inglise keeles *master device*), siis seetõttu saab Bluetooth ühenduste süsteem olla ainult P2P ja tähe tüüpi topoloogiaga – ANT protokollil selline piirang aga puudub ja see võimaldab ANT ühendustel rakendada lisaks ka puu ja võrgu topoloogia tüüpe [25].

Tabel 3: ANT ja Bluetooth LE tehnoloogia võrdlus

Tehnoloogia	ANT	Bluetooth LE
Sagedusala	2,4 kuni 2,483 GHz	2,4 kuni 2,483 GHz
Toetatud topoloogia tüübid	P2P, täht, puu, võrk	P2P, täht
Modulatsioon	GFSK	GFSK
Sageduskanali laius	1 MHz	2 MHz
Protokoll	Lihtne	Keerulisem
Andmeedastuskiirus	1 Mbit/s	1 Mbit/s

Signaaliulatus	50 m	50 m
Turvalisus	64-bitine võti	128-bitine AES
Andmete terviklikkuse kontroll	16-bitine CRC	24-bitine CRC

Äripoolne analüüs

Nii Bluetooth kui ka ANT on levinud tarbijaelektronika seadmetes. ANT-i ühendatavusega seadmete variatsioon on aga fokuseeritum kui Bluetooth-i oma. ANT-i sihtrakendusala oli alati meditsiin ja sport, kuid aastast 2011 hakkasid turule ilmuma ka ANT ühenduvusega nutitelefonid [24]. Bluetooth on aga palju levinum nutitelefonide ja tahvelarvutite turul – hiigelfirmad nagu Apple ja Samsung on seda tehnoloogiat juba ammu toetanud ja oma seadmeid kokkusobivatena teinud ning seetõttu on Bluetooth LE tarbijaelektronika turul palju levinum [27-28].

Ülevaade erinevatest akutüüpidest

Seadme elektrienergiaga varumiseks on mitu vahendit, millest väikeste kantvate seadmete puhul on kõige praktilisemad keemilised vooluallikad. Keemilised vooluallikad jagunevad ühekordselt ja mitmekordselt kasutatavateks ehk mittetaaslaetavateks ja taaslaetavateks. Esimese grupi vooluallikaid nimetakse ka patareideks, teist gruppi aga akudeks. Mõlema grupi vooluallikad jagunevad omaette nende füüsikalise ja keemilise struktuuri järgi tüüpideks, millel on omad eelised ja puudused ning on optimaalsemad erinevates rakendustes. Antud projekti puhul on tähtis, et vooluallikas oleks väike, taaslaetav, ohutu ning küllalt mahukas, et vastupidada mõned pikemad kasutussessioonid. Selleks on lähema uurimise jaoks väljavalitud 3 akutüüpi, mis täidavad neid nõudeid kõige paremin: liitiumioon-, liitiumraudfosfaat- ning liitiumpolümeerakud.

Liitiumioonakud

Liitiumioonaku (lühidalt Li-ioon aku) on taaslaetavat tüüpi aku, milles liitiumioonid liiguvad tühjenemisel negatiivsest elektroodist positiivse poole ning laadimisel

vastupidi. Need on ühed populaarsematest akutüüpidest, mida kasutakse kaasaskantavas elektroonikas ning nende energiatihedus on üks parimatest taaslaetavate akude seas. Aku keemiline koostis, jõudlus, hind ning ohutus on erinevates tüüpides varieeruv.

Liitiumraudfosfaatakud

Liitiumraudfosfaataku on taaslaetav akutüüp, mis on variatsioon liitiumioonakust, kus katoodi materjaliks on liitiumraudfosfaat(LiFePO_4). LiFePO_4 akudel on väiksem energiatihedus kui tarbijaelektronikas levinumates LiCoO_2 liitiumioonakudel, kuid ka pikem eluiga, suurem võimsustihedus ning parem ohutus.

LiFePO_4 aku üheks suureks miinuseks on selle väike energiatihedus – selle tõttu on raske leida piisavalt väikeste mõõtmetega ja suure mahtuvusega aku. Kui aku füüsiline suurus poleks tähtis, siis oleks see akutüüp oma pika eluea ning pinge stabiilsuse tõttu väga hea valik. Nendest eripäradest tulenevalt on LiFePO_4 aku leidnud rakendust autodes ning mootorrattastes pliikude asendajana[29-30].

Liitiumpolümeerakud

Liitiumpolümeerakud (tihti lühendatud kui Li-poly, Li-Pol, LiPo, LIP, PLI või LiP) on taaslaetavad akud. LiPo akud koosnevad tavaliselt mitmest identsest paralleelühenduses elemendist, et vähendada aku enesetühjenemist ning lisaks tihti jadamisi ühenduses “pakkides”, et suurendada aku pinget. Liitiumpolümeeraku raku pinge on vahemikus umbes 2,7V (tühjakslaetud) kuni umbes 4,23V (täislaetud).

Üks liitiumpolümeeraku eripäradest on nende geomeetria – jäiga kesta puudumise tõttu on rakk elastne ning see võimaldab tootjatel voltimise teel valmistada erinevate kujude ning mõõtmetega akusid. See võimalus puudub liitiumioonakul, liitiumpolümeeraku eelkäial.

Liitiumpolümeeraku üheks nõrgaks kohaks on selle ohutus. Igasuguse lühise või

füüsilise vigastuse tekkimine võib põhjustada aku süttimist või isegi plahvatamist. Samuti on aku laadimiseks ranged reeglid, mille rikkumine võib tekitada pöördumatut kahju.

Riistvara Projekteerimine

Nõuded loodavale kommunikatsioonimoodulile

Loodav kommunikatsioonimoodul peab vastama järgmistele nõuetele

- Elektroonika füüsiline suurus peab olema võimalikult väike ning koos andurite mõõtmistulemusi töötleva mooduliga mahtuma talle keskossa .
- Voolutarve peab olema minimaalne. Valitud vooluallikaga peab kogu sensortald vastu pidama vähemalt 4 tundi aktiivset tööd.
- Kommunikatsioonimoodul peab suutma saata välisseadmesse andmeid, mis laekuvad mahus 28 baiti 100 korda sekundis ning sealjuures peab andmekadu olema minimaalne.
- Valitud kommunikatsiooniprotokoll peab olema levinud nutitelefonides ja tahvelarvutites, mis on koos spetsiaalselt arendatud programmiga sensortalla peamiseks kasutajaliidesteks.
- Kommunikatsiooni raadiosignaali võimsus peab olema piisavalt suur, et see läbiks 2 meetrit ilma andmekahjusteta olukorras, kus signaali allikas on inimese jala tallas ja vastuvõtja seade kasutaja käes näo kõrgusel.
- Kahe sensortalla mõõtmistulemused peavad olema sünkroniseeritavad ning nutiseadme poolt üheaegselt vastuvõetavad.

Antud projekti disaini jaoks otsustati kasutada Bluetooth tehnoloogiat ennekõike selle suure vastuvõtjaseadmete (nutitelefonid, tabletid) valiku pärast ning võrreldes ANT-ga selle lihtsa personaalarvutiga ühenduvuse pärast.

Vooluallika valik

Elektroonikaseadme jaoks vooluallika valimisel on tähtis võrrelda mitmeid võtmeperameetreid:

- Vooluallika geomeetria – Talla piiratud ruumi pärast on väga tähtis valida aku kujuga, mis ei oleks seadme kasutamisele takistuseks ning ei kujutaks talle kandjale endast ohtu.
- Vastupidavus – Igale elektroonika kasutajale on tähtis säästa aku vahetuse arvelt raha. Selleks on vaja, et aku peaks vastu võimalikult palju taaslaadimisi. Alternatiiviks on mitte-taaslaetav patarei mille mahtuvus on piisavalt suur. Vastupidavuse mõõtmisühikuks on tsüklite arv, kus tsükel on taaslaetava aku täis- ja tühjakslaadimise protsess.
- Mahtuvus – Sensortalla peamine eelis sarnase rakendusega sensormati ees on selle mobiilsus. See eelis võimaldab kasutajal teha pikemaid jooksu ning saada mõõtmistulemusi reaalsetes jooksmise tingimustes. See eelis aga tähendab, et talle kasutamise sessiooni ajal on ainsaks vooluallikaks seadme külge ühendatud patarei või aku ja selle taaslaadimine jooksu ajal pole võimalik. Selleks, et tal oleks kasutatav pikemate jookside, näiteks maratonide, raames, peab aku mahtuvus olema piisavalt suur, et see hoiaks seadme kogu jooksu ajaks kasutatavana. Mahtuvust mõõdetakse vooluallikates milliamper-tunnis ehk mA/h ühikutes.
- Ohutus – Kuna sensortald on pidevalt selle kasutaja kehaga lähedases kontaktis, siis on ohutus eriti tähtis. Ohutuse näitajateks pean aku keemilist- ning termilist stabiilsust.
- Nimipinge vahemik – Kindlad elektroonikakomponentide komplektid vajavad tööks kindlaid sisendpinge vahemikke. Ideaaljuhul töötaksid kõik elektroonikaskeemi komponendid optimaalselt samal sisendpingel. Tihti pole see aga võimalik. Selleks et kasutada ühte vooluallikat ning panna töötama kõik komponendid neile sobival pingel kasutakse skeemides pingejagureid ning *logic level shifter* ehk loogika-taseme- nihke skeeme. Ruumi ning ressursside säästmiseks on tähtis neid pinget reguleerivaid skeeme vältida. Selleks on tähtis, et valitud aku nimipinge ning teiste komponentide

optimaalne sisendpinge oleksid võimalikult lähedased.

Analüüsitud akutüüpide seast langes valik liitiumioonakule, sest seda on kerge leida vajalikul nõöpelemendi kujul, see on liitiumpolümeerakuga võrreldes ohutum ning selle energiatihedus on suurem kui liitiumfosfaatakul.

Ülevaade erinevatest Bluetooth kiipidest

Bluetooth integraallülitis kui projekteeritava kommunikatsioonimooduli tuum on vaieldamatult kõige tähtsam valik antud disainis. See komponent võimaldab Bluetooth protokolliga signaale saata ning vastu võtta.

Bluetooth kiipe jagatakse peamiselt nende tagasiühilduvuse (*Single Mode*, *Dual Mode*), tootja (Nordic Semiconductor, Texas Instruments) ning neile sobivate *Bluetooth Stack*-de alusel. Antud projekti puhul on Bluetooth integraallülituse valimisel tähtis, et kiip oleks võimalikult väike, väikese voolutarbega, levinud tugikommuniga ning plussiks on ka lisafunktsionaalsused nagu integreeritud lisakomponendid ja standardi tagasiühilduvus. Neid parameetreid oli võrreldud järgmistes integraallülitustes: Bluegiga BLE112, Laird Technologies BL600, Hosiden HRM1023, Nordic Semiconductor nRF51822 ja Texas Instruments CC2564. Kõige sobivamateks, eriti kiibi suuruse ja vooltarbe poolest, osutusid kaks integraallülitust erinevate lisafunktsionaalsustega - integreeritud mikrokontrolleriga mittetagasiühilduv nRF51822 ja ilma lisakomponentideta aga tagasiühilduvuse funktsionaalsusega CC2564.

Tabel 4: nRF51822 ja CC2564 Bluetooth kiipide võrdlus

	nRF51822	CC2564
Tootja	Nordic Semiconductor	Texas Instruments
Tagasiühilduvus	Single Mode	Dual Mode
Ametlikult toetatud	S110, S120 Softdevice	Bluetopia BLE Stack

Bluetooth Stack tarkvara		
--------------------------	--	--

Nordic semiconductor NRF51822

NRF51822 on üks Nordic Semiconductori nRF seeria 2.4GHz raadio sagedusala mitmeprotokollilistest SoC kiipidest. Tehaseseadetel ning selle toetatud stackidega võib nRF51822-l kasutada nii Bluetooth LE kui ka Nordic Semiconductori oma litsensivaba 2.4GHz protokoll nimega Gazell. Olemas on aga ka sama riistvara arhitektuuriga, mõne väiksema sisseehitatud tugifunktsionaalsusega, nRF kiipe, mis toetavad lisaks ka teisi 2.4GHz raadiosuhtluse protokolle – näiteks nRF51422 võimaldab lisaks eelnimetatule ka ANT funktsionaalsust.

Üks Nordic Semiconductori nRF seeria eripäraks on, et ühte kiipi on sisseehitatud nii raadiosuhtluse riistvara, kui ka mikrokontroller selle juhtimiseks (enamasti Cortex M0 tüüpi). See lihtsustab elektroonikaplaadi disaini, säästab plaadil ruumi ning antud juhul garanteerib toetatud MCU ja raadiosuhtluse riistvara kombinatsiooni toega Bluetooth Stack tarkvara ning levinud tugikommuni olemasolu. Disaini poolest on vähese ruumiga plaatide puhul Cortex M0 üldotstarbeliste IO protsessori jalgade süsteem väga kasulik – kiibi paigutuse tähtsus väheneb, sest konkreetsete liideste (SPI, UART, I2C) jaoks võib kasutada ükskõik milliseid jalgu, ning neid tarkvaraliselt vastavaks rolleks seadistada.

Spetsiifilisemate rakenduste jaoks on olemas kolmanda osapoole kiipe, mis integreerivad väiksesse kiipi nRF51822 integraallülitust ning selle jaoks tugikomponente. Näiteks prantsuse firma Insight SiP on koostöös saksa firma Tekmodul-ga loonud nRF51822 põhjal kiipi nimega ISP130301, mis kahe välise ostsilaatori (16 ja 32 MHz) ja integreeritud antenni kujul laiendab baaslülituse funktsionaalsust, hoides ruumikulutused minimaalsetena.[31]

Texas Instruments CC2564

CC2564 on Texas Instruments seitsmenda generatsiooni Bluetooth tuuma baasil

loodud Bluetooth BR/EDR/LE HCI lahendus. Seda komponenti klassifitseeritakse kui Dual Mode Bluetooth LE seadet, ehk Bluetooth 4.0 transiiver, mis toetab lisaks ka Bluetooth eelmisi versioone. Texas Instruments kiidab selle komponendi kõrgkvaliteedilist raadiosignaali saatmise võimsust ning vastuvõtu tundlikkust, väites, et see on võrreldes teiste sama klassi BLE seadmetega kaks korda võimsam.

Komponendi miinuseks on, et selles ei sisaldu mikrokontrollerit ning ametlikult toetatud Bluetooth Stack tarkvara töötab ainult kindlate mikrokontrolleritega: Texas Instruments MSP430, ARM Cortex M3 ja M4, mis on võrreldes ARM Cortex M0 protsessoriga võimsamad, kuid ka suurema voolutarbega. Kuna sensorite andmete kogumiseks oli juba valitud kindel mikrokontroller (ATXMEGA32A4), mille jaoks oli kohandatud disain ning kirjutatud tarkvara, siis tsentraalse mikrokontrolleri väljavahetamine ei olnud eelistatud variant. Teiste mikrokontrollerite jaoks Bluetooth Stacki kohandamine on keeruline protsess ning StoneStreet One, Bluetopia BLE stacki arendaja, nõuab ATXMEGA32A4 jaoks stacki ning 3 profiili kohandamise eest 35 000 US dollarit, mis pole antud projekti jaoks otstarbekas kulutus.

Nagu ka nRF51822 puhul, on CC2564 komponendi baasil tehtud kolmanda osapoole laiendustega kiipe. Üks selline kiip on LS Research TiWi-UB2. See moodul on võrreldes ISP130301 mooduliga väheste laiendustega – CC2564 integraallülituse kõrvale on lisatud vaid üks 38,4 MHz ostsilaator ning antenni sisendi filter [32].

Bluetooth integraallülituse valik ja põhjendus

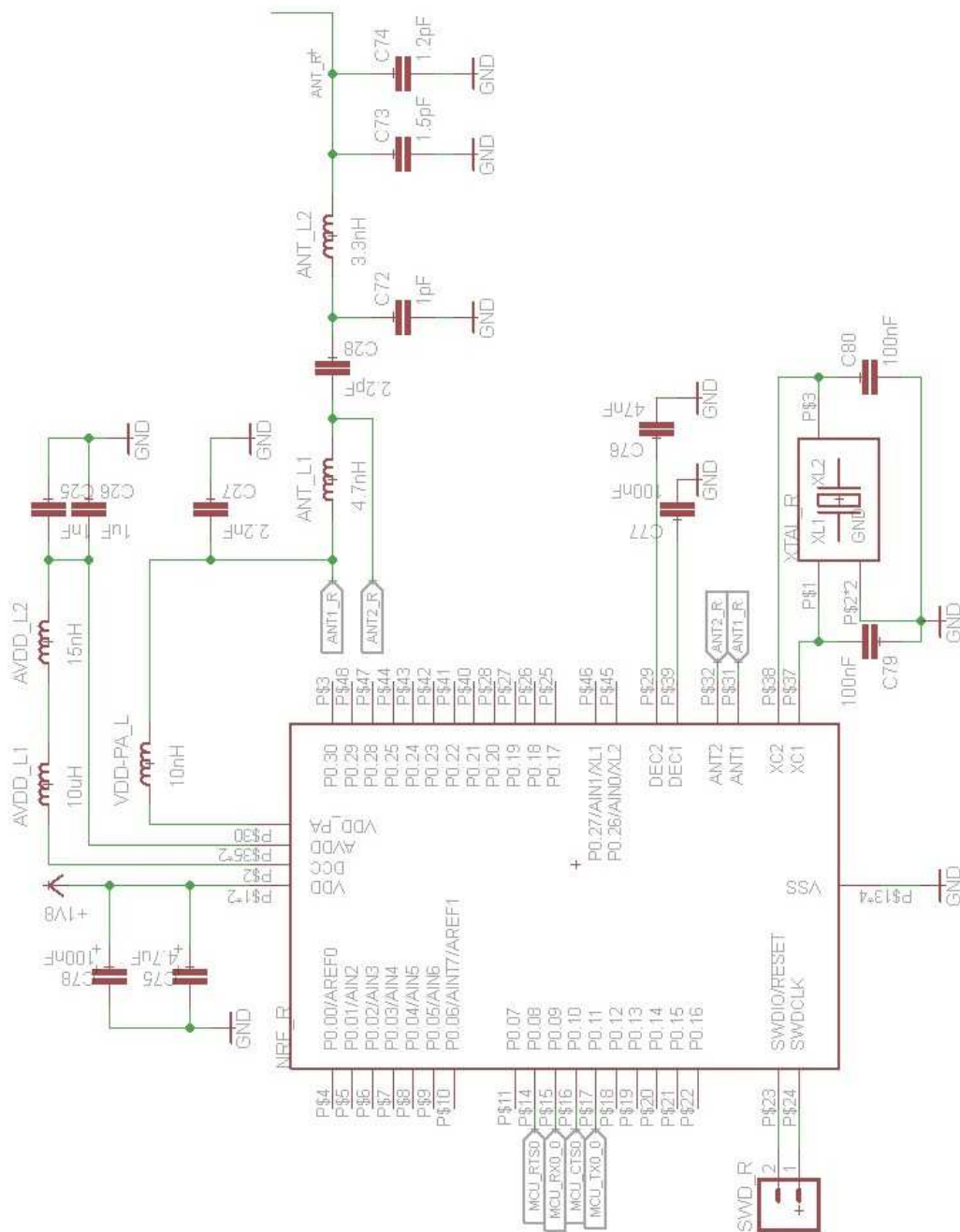
Antud projekti raames katsetasin mõlemat moodulit. CC2564 integraallülituse katsetamisel ilmnes probleem, kus juba kasutusel oleva ATXMEGA32A4 mikrokontrolleri jaoks puudus vastav Bluetooth Stack. Selle probleemi lahenduseks üritasin kohandada olemasolevat MSP430 stacki, kuid lõpuks otsustasin kasutusele võtta teise Bluetooth moodulit, sest Bluetooth *stacki* teise mikrokontrolleri jaoks kohandamine oleks ajaliselt liiga kulukas. Kogu see aeg polnud aga asjatult kulutatud, sest suur osa programmist on mõlema mooduli puhul analoogiline - Bluetooth Stacki sisemine toimimisloogika tegevustest, HCI protokoll kasutamine, Bluetooth protokoll käskude, vastuste ning sündmuste andmepakettide koostis, ning juhtprogramm C-

keeles.

Uueks Bluetooth integraallülituseks valisin nRF51822, mille jaoks sai tellitud ka proovikomplekt, mille peal sain prototüüpprogramme kirjutada, enne kui need sensortalla plaadile üles laadida.

Bluetooth integraallülituse elektroonikaga liidestamine

Bluetooth kiip kui kommunikatsioonimooduli peamine komponent on ühenduses mitmete teiste komponentidega erinevate liideste kaudu. Need ühendused on väljatoodud pildil 3.



Pilt 3: nRF51822 kiibi osa Softsensi sensortalla elektroonikaplaadi skeemis

nRF51822 integraallülitusega on elektroonikaplaadil ühenduses tsentraalne MCU(ATXMEGA32A4), väline 16 MHz ostsillaator CX2520SB ning kasutamiseks väljatoodud raadioside võimsust suurendava antenni rajad ning programmeerimiseks SWD liidese viigud.

Tsentralse MCU-ga ühendus on asünkroonse RS-232 UART jadaliidese kaudu, mille peamised viigud on RxD (*Received Data*) ja TxD (*Transmitted Data*), mis on liideses vastavalt andmebaitide vastuvõtja ja saatja pooled. Lisaks on väljatoodud liidese sünkroniseerimiseks 2 lisaviiku: CTS (*Clear To Send*) ja RTS (*Ready To Send*), mis on USART (sünkroonne variatsioon UART standardist) suhtlusprotokollis indikaatoriteks kui seade on liidese kaudu lubatud saatma (CTS) ja kui seade on ise valmis andmeid vastuvõtma (RTS). Kõik need viigud on teise seadme pool vastupidise rolliga - viik, mis ATXMEGA32A4 pool on RxD on nRF51822 integraallülituse jaoks suhtlusprotokollis kui TxD ja nii edasi.

nRF51822 programmeerimine toimub SEGGER JLink programmeatori SWD liidese kaudu. SWD liidese tähtsamad viigud on andmevoo sisend/väljund (SWDIO), kellatakt (SWDCLK) ja taaskäivitamine (RESET), millele lisaks peab programmeatori liidese külge ühendama ka pinge väljundi (VCC) ja maa (GND). nRF51822 kiibi eripära on, et selle SWDIO ja RESET asuvad samal mikrokontrolleri jalal. Selleks, et programmeator sellest aru saaks, on vaja paigaldada nRF arendamise tööriistad, mille seas on arenduskeskkonna Keil programmeerimise laiendus, mis rakendab kiibi peale programmi üleslaadimiseks spetsiifilised võtted.

Antenni jaoks on antud kiibil 2 spetsiifilist jalga: diferentsiaalse antenni ühenduse vastuvõtu (Rx) ja saatja (Tx) pool. Praeguses elektroonika versioonis 0,6 pole antenni veel lisatud. Välise ostsillaatori jaoks on nRF51822-l kaks kiibi jalga: analoogsisend XC1 analoogväljund XC2.

Tarkvara arendamine

Tarkvaraarenduse tööriistad

nRF51822

- Keil uVision 5
- nRF Go Studio
- nRF51 series SDK

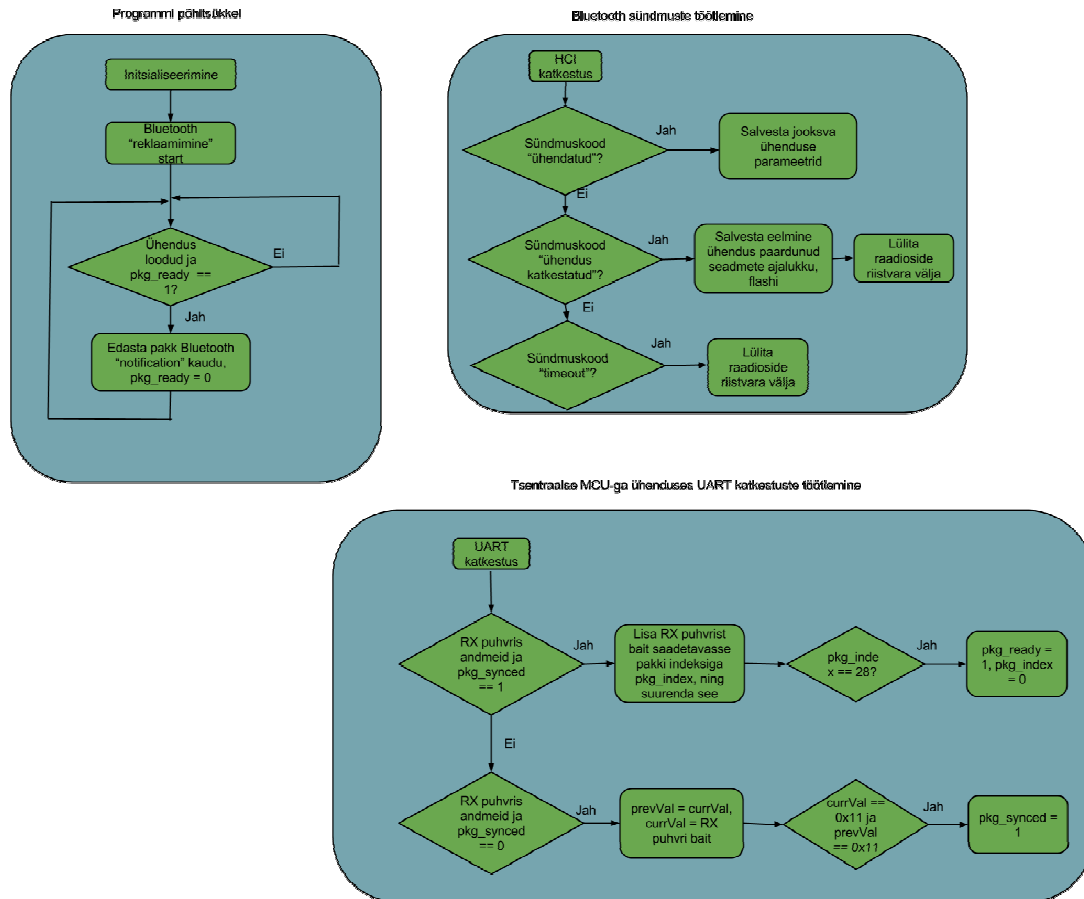
- nRF SoftDevice S110 (Bluetooth LE stack)
- **Android**
- Android SDK
- ADB silumise tööriistad

Bluetooth mooduli tarkvara

Bluetooth integraallülituse tarkvara koosneb kahest osast – Nordic Semiconductor poolt kompileeritud Bluetooth Stack (Softdevice S110) ning autori poolt kirjutatud kontrollprogramm. Bluetooth Stack tegeleb Bluetooth riistvara madala taseme kontrollimisega nagu kontrollprogrammi käskude HCI käskudeks tõlkimisega, sündmuste sorteerimise ning vastavasse kontrollprogrammi edastamisega ning GATT aadresside haldamisega. Kontrollprogramm, kui programmeerija jaoks lihtsustatud liides, rakendab nRF51 series SDK teeke, et suhelda Bluetooth Stackiga ning juhib põhiloogikat.---

Softsens rakenduse puhul on kontrollprogrammi peamiseks eesmärgiks sensorite mõõtmistulemuste vastuvõtmine ning nende edastamine Android appi jaoks loetaval kujul üle Bluetooth-i, samal ajal kulutades minimaalselt elektrivoolu. Bluetooth kaudu saadetakse üle paaritatud seadmega ühenduse andmed eelnevalt ettevalmistatud teenustesse ehk *service*-tesse. Seega võib kontrollprogrammi jaotada järgmistesse staadiumitesse:

- Vajalikkude funktsionaalsuste initsialiseerimine
- Bluetooth GATT profiili ülesehitamine
- Reklaamimine ning tegevuseta oleku seadistamine
- Sensorandmete vastuvõtt ning edastus



Joonis 1: Bluetooth mooduli programm

Kontrollprogrammi jaoks vajalikud funktsionaalsused on taimerid, BLE *stack*, BLE sündmuste vastuvõtjad, HCI UART (seda initsialiseerib BLE *stack* ise), sensorandmete vastuvõtja UART.

Taimereid on vaja Bluetooth *stacki* töö jaoks – sisemiselt põhineb raadiosaatja riistvara kasutamine taimerite katkestustel, kus katkestuse täitmisel lülitakse vastav riistvara sisse, et impulssiga genereerida signaal ning see kohe välja lülitada kuni järgmise katkestuseni.

BLE *stacki* initsialiseerimine toimub ühe SDK funktsiooniga, mis võtab parameetriteks ostsillaatori allika ning selle kalibreerimise sageduse konfiguratsiooni bitijada näol, mille kombinatsioonide jaoks on SDK-s makrod. Lisaks on pärast Bluetooth *Stacki* initsialiseerimist vaja seadistada ka BLE sündmuste töötleja

funktsioon, mis sündmuse koodi esimeste baitide järgi suunab väljakutse õige sündmusetüübi töötleja funktsiooni.

Järgmisena koostatakse Bluetooth GATT profiil, mis hakkab olema kommunikatsioonimooduli andmeedastusraamistikuks. Selle profiili kõige tähtsam komponent on eriotstarbeline Softsens *service*, mille andurite *characteristic*-sse hakkavad saabuma andurite väärtused. Selleks, et eristada neid GATT komponente tüüpikendustest, said nii Softsens *service*, kui ka andurite *characteristic* GATT profiili registreeritud oma eriliste UUID-dega - see võimaldab Android programmil Bluetooth kaudu otsida ainult sensortalda.

Kui kõik on initsialiseeritud ning GATT profiil koostatud, alustatakse Bluetooth “reklaamimist” ehk endast teavitava signaali laialisaatmist. Selle signaali eesmärgiks on teistele Bluetooth seadmetele teada anda, et sensortald on valmis ühenduse loomise kutseid vastu võtma.

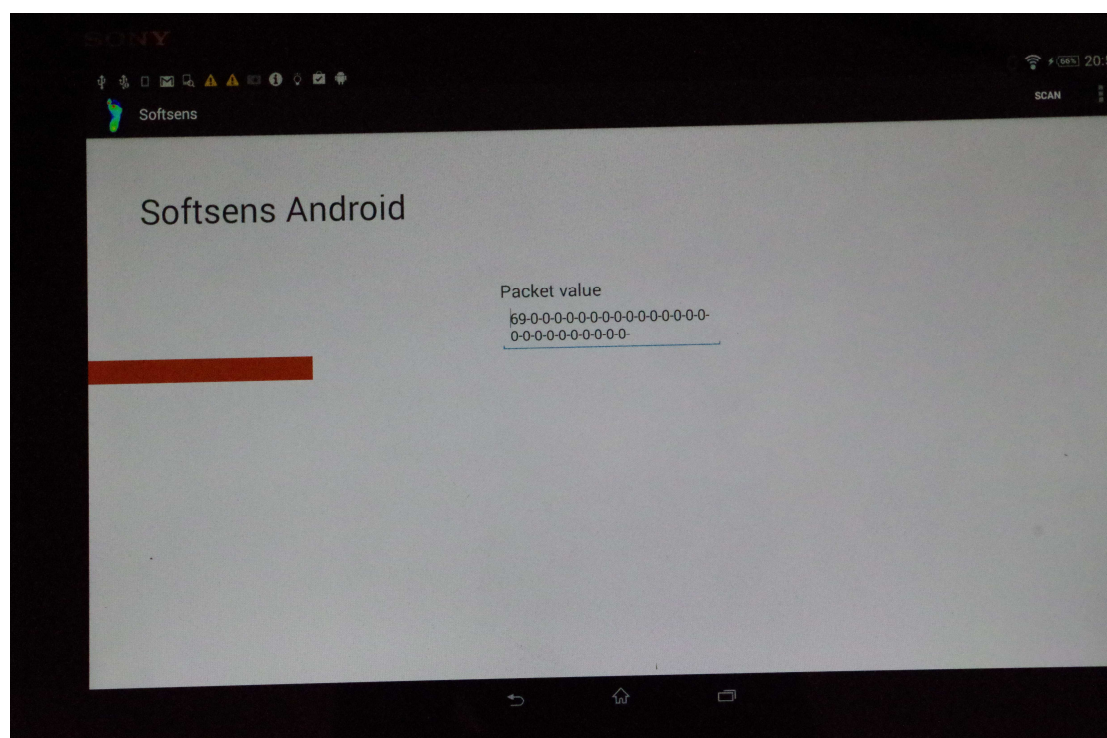
Kui ühendus on loodud, siis on Bluetooth moodul passiivses olekus kuni üks andurandmete pakett saab täis ning siis edastatakse see pakett GATT profiili Softsens *service* andurite *characteristic*-sse. Pakett täitub programmi UART katkestuse osas, kus sünkroniseeritakse paketi struktuur ning siis täidetakse üks bait haaval baidijada kuni selle pikkus saab 28. Kui pakett on täitunud antakse sellest teada ka programmi põhiosale, mis teostabki siis paketi edastuse Bluetooth kaudu.

Android

Kasutajaliides teostati Android programmi kujul, mille eesmärgiks oli väljastada andurite mõõtmistulemused tavakasutajale arusaadaval kujul ning lisaks ka detailsemal kujul, mille põhjal saab teha statistilist analüüsi.

Antud bakalaureusetöö raames valmis programm kujule, kus kuvatakse terve andmepaketi baidijada tekstikujul ning lisaks värvitakse maatriksis olevaid ristkülikuid vastavalt sensorbaitide väärtusele - erkroheline värv on väärtuste nullpunkt ja mida rohkem rõhku rakendatakse andurile seda punasem on sellele

andurile vastav riskülik.



Pilt 4: Pilt Android programmi prototüübist. Keskkel paketi baidijada, vasakul oranž ristkülik, mis vastab paketi esimesele baidile.

Esimene asi mida programmi käivitamisel tehakse on kontroll: kas kasutatud seadmel on Bluetooth LE tugi. Kui ei ole, siis teavitatakse sellest kasutajat ning suletakse programm. Vastasel juhul initsialiseeritakse programmi kasutajaliides ning oodatakse kasutaja sisendit. Ainus kasutajaliidese sisend on paremal ülemises nurgas nupp “scan”, mille peale vajutades käivitatakse Bluetooth LE reklaamsignaali skaneerimine. Kui leitakse seade, millel on Softsens seadmele vastav GATT profiili struktuur, siis lisatakse see listi ning kuvatakse “scan” nupu kõrvale menüüobjekt, mille peale vajutades kuvatakse leitud seadmete nimed. Kui vajutada seadme nimele, siis paaritatakse nutiseade selle seadmega ning üritatakse kohe sisse lülitada andurite pakettide automaatne vastuvõtmine, ehk “*notification* režiim”. Kui see õnnestub, siis hakkab pärast seda perioodiliselt käivituma *notification* sündmuse töötlemine, kus loetakse iga kord uus pakett ning kuvatakse seda nii teksti kui ka värviliste kastide kujul kasutajaliideses.

Antud programm on Android platvormi põhise kasutajaliidese esimene prototüüp, mida on plaanis edasi arendada. Samuti leiab see programm rakendust sensortalla testimises, kus värviliste kastide värvimuutus võib lihtsustada andurite väärtuste muutumise jälgimist reaalsajas.

Katsed ning tulemused

Bluetooth levi ja paketikadu

Komplekteeritud riistvara ning tarkvara piirangute selgitamiseks viidi läbi mõned katsed. Katsete läbiviimiseks kasutati Nordic Semiconductori Android programmi “nRF Master Control panel” versioon 3.5.0, mis lõi sensortallaga Bluetooth ühenduse ning luges Bluetooth integraallülituse kontrollprogrammist perioodiliselt saadetud andmepakette, mis sisaldasid staatilisel positsioonil andmepakettide loendajat - see võimaldas kontrollida andmepaketi struktuuri terviklikust ning välja tuua paketikao juhtumid. Kasuks tuli ka nRF Master Control Paneli logimise funktsionaalsus, mis salvestas lisaks kõikidele Bluetooth tegevustele ka nende tegevuste ajatemplid.

Logide kiire analüüsimise jaoks kirjutati Javas logianalüsaatori programm, mis regulaaravaldiste kaudu filtreerib logifailist välja vajalikud andmed, tuvastab paketikao juhtumid, loendab pakettide arvu ja kao ning genereerib paketiedastuse ülevaatliku faili, kus on selgelt välja toodud kõik paketikao juhtumid. Kõigi katsete jaoks kasutati 5000 saadetud paketilist mahtu.

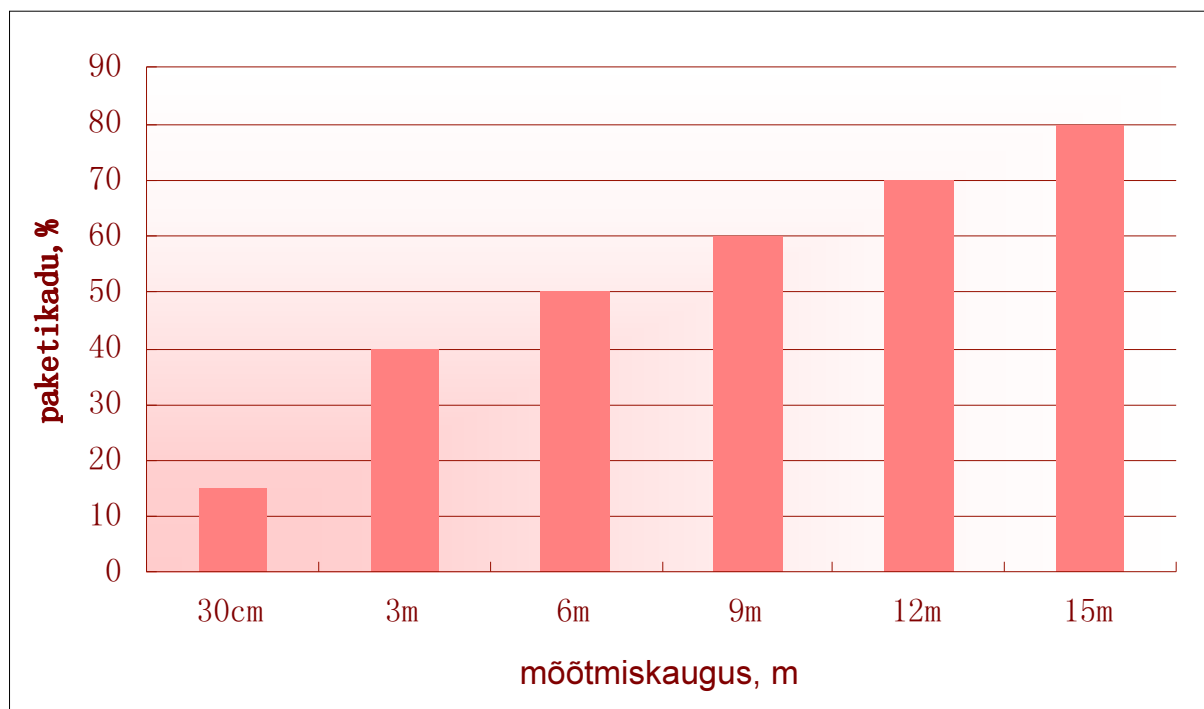
```
val: 67
Missed
Missed
val: 70
val: 71
val: 72
Missed
val: 74
val: 75
val: 76
val: 77
val: 78
val: 79
val: 80
val: 81
val: 82
val: 83
val: 84
val: 85
val: 86
val: 87
Missed
Missed
val: 90
val: 91
val: 92
Missed
val: 94
val: 95
val: 96
val: 97
Missed
val: 99
val: 0
val: 1
val: 2
val: 3
val: 4
val: 5
val: 6
val: 7
val: 8
val: 9
val: 10
val: 11
val: 12
=
```

Joonis 2: Analüsaatororigrammi poolt genereeritud logifail

```
Total packages sent 3897, missed 231
Finished filtering
```

Joonis 3: Analüsaatorprogrammi kokkuvõte

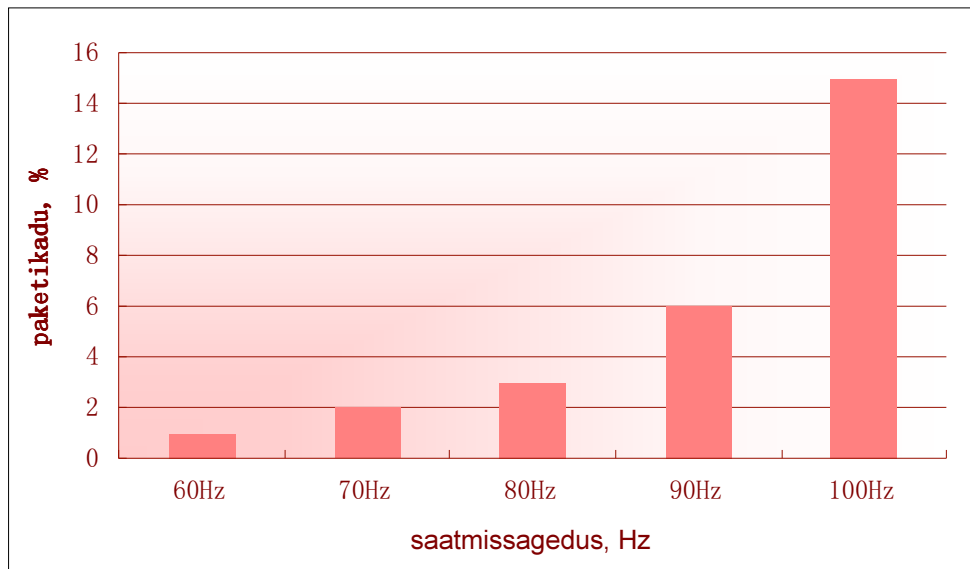
Esiteks testiti eeldatud andmepakettide saatmist maksimaalse sagedusega (100 Hz) ning paketikadu erinevatel kaugustel – 30cm, 3m, 6m, 9m, 12m ning 15m. (Graafik 1).



Graafik 1: Suhteline andmekadu (%)100Hz sageduse juures

Tulemustest selgub, et 100Hz sagedus on liiga suur Bluetooth LE andmeedastuse jaoks. Katsete logide ajatemplitest on näha, et kõiki pakette ei saadeta välja samal ajal kui selleks käsk antakse, vaid tekib pudelikaela efekt ning täitub puhver, mida pikemate perioodide järel tühjendatakse. Kirjanduse andmetel tuleneb see piirang sellest, et Bluetooth LE standard võimaldab saata ühe ühenduse intervaliga maksimaalselt 3 “notification” impulssi, milles iga pakett on maksimaalselt 20 baiti pikk[33]. Seega on iga andurite andmepaketi edastamiseks vaja teha ühes ühenduse intervallis 2 “notification” impulssi, ning kui seda ei suudeta teha 10ms aja jooksul, siis hakkab Bluetooth väljasaatmise puhvris paketi arv kasvama kuni puhver ületäitub ja ei võta pakette vastu – sellest ka osaline paketikadu.

Nii suur paketikadu ei ole antud rakenduse jaoks sobilik. Alternatiivi otsimiseks teostati veel katseid paketi edastusest erinevatel sagedustel, kaugusel 30cm.



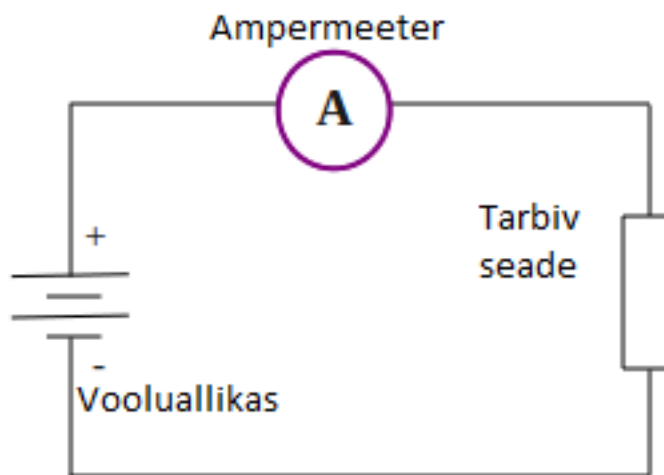
Graafik 2: Suhteline andmekadu (%) erinevatel sagedustel 30cm kaugusel tallast.

Tulemustest selgub, et viimane stabiilne paketi edastussagedus on 60Hz. Kõlblikud sagedused on ka 70 ja 80 Hz, kus paketikadu on ainult 2 ja 3 protsenti. Antud projekti jaoks otsustati aga lahenduseks vähendada andmeedastuse käivitamise sagedust nelja korrani sekundis, kuid samal ajal suurendada ühe andmeedastuse sessiooniga edastatud pakettide arvu - nii jääb saadetud andmete hulk samaks nagu algul plaanitud ja kuna kasutaja kõiki 100 mõõtmistulemust sekundis ei jõuagi tähele panna ja tõenäoliselt see info väljaspool statistilisi diagramme ei oma tähtsust, siis ei mõju see ka seadme kasutatavusele.

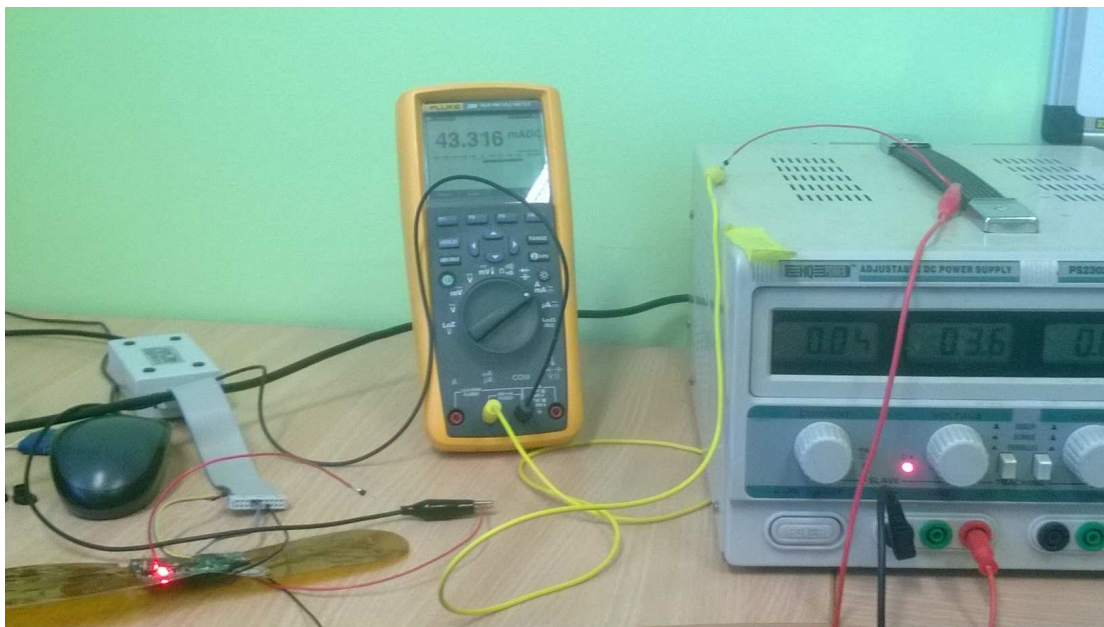
Voolutarve

Kantavate andurite üheks tähtsamaks parameetriks on vastupidavus: kui kaua saab seade kaasasoleva vooluallika abil aktiivselt töötada. Selle karakteristiku hindamiseks on vaja teada seadme voolutarvet.

Järgmised katsed viidi läbi nii liitiumioon nööpelemendiga kui ka toiteploki. Voolutarbe mõõtmiseks kasutati multimeetri ampermeetri funktsionaalsust, ühendades multimeetri elektroonikaplaadi ja vooluallika vahele jadamisi.



Pilt 7: Ampermeetriga elektrivoolu mõõtmise skeem



Pilt 8: Skeemi realiseerimine toiteploki

Katsetega mõõdeti voolutarve nii terveist sensortalla elektroonika komplektist kui ka nRF51822 mooduli jaoks eraldi. Pinge sisendiks oli antud 3,6 Volti, ning toiteploki puhul seati elektrivoolu limiidiks 75 mA.

Tabel 4: Kogu elektroonikaplaadi aktiivse töö voolutarve

Režiim	Seadme voolutarve
Ilma nRF51822 tarkvarata	49 mA
Bluetooth “reklaamimise” ajal	50 mA
Pärast Bluetooth ühenduse loomist, aga enne andmete saatmise algust	50 mA
Bluetooth andmeedastuse ajal	50 mA

Kasutusel oli liitiumioonaku LIR3048, mille nominaalmahtuvuseks on 200 mAh - see tähendab, et antud seadme puhul on selle aku tugiaeg umbes neli tundi, mis vastab eelnevalt seatud nõuetele.

Kokkuvõte

Kantavad andurid on kiiresti arenev turg, mis leiab rakendust nii meditsiinis kui ka spordis. Üks uuematest kantavate andurite rakendusala-dest on pedobarograafia ehk labajala rõhujaotuse analüüs, milleks praeguse- ni kasutatakse peamiselt statsionaarseid seadmeid nagu rõhumatte. Selle tehnoloogia kantavaks tegemine esitab inseneridele uusi väljakutseid, mille lahendamiseks tuleb rakendada viimase aastakümne edusamme mikroe- lektronikas.

Käesoleva töö eesmärgiks oli Tartu Ülikooli Tehnoloogia Instituudi projekti, labajala rõhumõõ- tja sensortalla “Softsens”, jaoks disainida ning realiseerida raadioside kommunikatsioonimoodul, mille kaudu edastatakse andurite mõõtmistulemused kasutajaliidesesse.

Töö käigus analüüsiti erinevaid raadioside standardeid ja vooluallikate tüüpe. Raadioside standardiks valiti Bluetooth ning vooluallika tüübiks liitiumioonaku. Valitud raadioside standardi jaoks valiti välja kaks Bluetooth LE integraallülituse kiipi ning komplekteeritine- dele vastavad sensortalla elektroonikaplaadid. Nende kahe integraallülituse jaoks koodi kirjutamisel selgus, et üks kiipidest on ülejäänud sensortalla elektroonikaga halvasti ühilduv ning sellega tegevus lõpetati. Kasutusele jäänud kiibiga ning vastava elektroonikaplaadiga viidi läbi katseid, mille käigus on loodud ka Android rakenduse logide analüsaator. Katsete tulemustest selgus optimaalne Bluetooth ühenduse konfiguratsioon.

Loodi ka ka Android platvormi põhise kasutajaliidese esimene prototüüp, mis kuvab Bluetooth kiibi poolt saadetud pakette tekstilisel ning graafilisel kujul, olles dünaamilise rõhukaardi loomise alusetapiks.

Summary

Wearable sensors is a rapidly growing market which finds application in many fields, including medicine and fitness. One of the more recent applications for wearable sensors is pedobarography, also known as the analysis of the pressure fields of the foot. Until now, mostly stationary floor-based devices like mats have been used for this end. Making this technology wearable poses many challenges for engineers, the solution requires the application of the latest improvements in microelectronics.

The aim of this bachelor's thesis was to design and create the communications module for the Tartu University Institute of Technology project "Softsens", which is a wearable plantar pressure measuring device.

Different wireless standards and power supplies were analyzed as part of this thesis. The chosen wireless standard and the power supply type were Bluetooth and lithium-ion coin cell, respectively. Two different Bluetooth LE integrated circuits (were selected based on the requirements of the device, circuit boards were designed and assembled for both of them. While writing code for these circuits, it became apparent that one of them is not quite compatible with the rest of the planned electronics, work with that circuit board was then stopped. The remaining chip solution underwent some tests, during which an Android application's log analyzer was programmed. Based on the tests, an optimal configuration was established.

Finally, an Android application prototype was created, which displays the data packets sent by the Bluetooth circuit both in text and graphical form. The graphical form is the first step towards the development of a real-time pressure map.

Kasutatud kirjandus

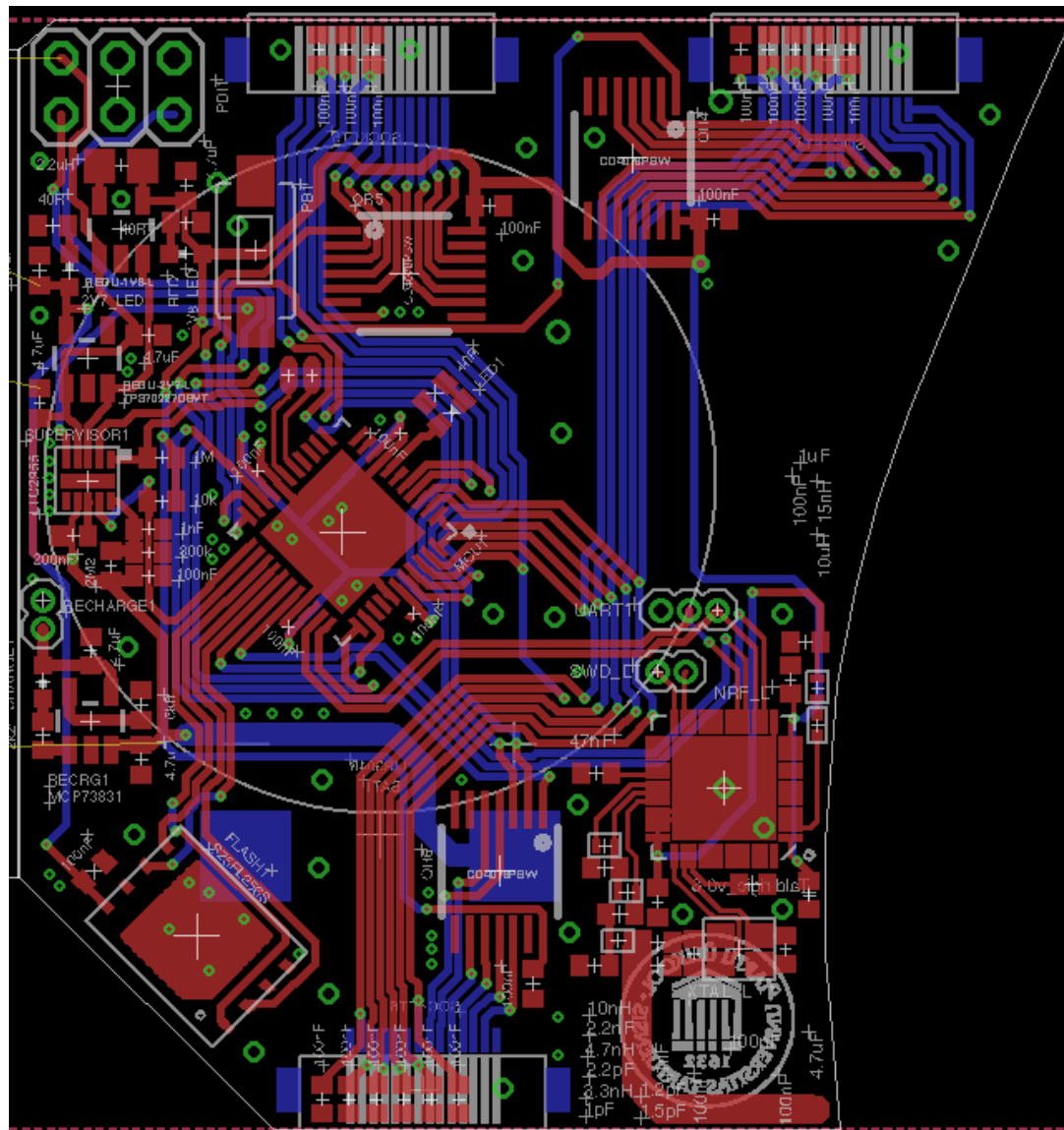
1. Wikipedia, Trükkplaat,[Viimati vaadatud: 13.05.2014]
<http://et.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%BCkkplaat>
2. Wikipedia, Flexible Circuit,[Viimati vaadatud: 14.05.2014]
http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_circuit
3. Stephanie P. Lacour, Soft and elastic circuits for electronics anywhere, not just everywhere, Perada Magazine 10.2417/2201007.0031942010, lk 1,
4. Yuriy Chaban, Dreamstime, Vintage radio circuit image, [Viimati vaadatud: 14.05.2014]
<http://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photography-vintage-radio-circuit-image10490977>
5. Fujitsu, Fujitsu Launches Multimode, Multiband RF Transceiver IC, [Viimati vaadatud: 14.05.2014]
http://www.fujitsu.com/sg/news/pr/fmal_20090916.html
6. Gait Analysis Offered at Mercy in Baltimore, Mercy MD, [Viimati vaadatud: 26.05.2014]
http://mdmercy.com/centers-of-excellence/orthopedics-bone-and-joint/institute-for-foot-and-ankle-reconstruction/diagnostic-and-specialty-services/diagnostic-services/gait-analysis?sc_lang=en
7. Orthoinfo, Adult Acquired Flatfoot, [Viimati vaadatud: 13.05.2014]
<http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00173>
8. Uday Kumar, Flat Foot Problem Explained in Detail (for Indian Armed Forces Aspirants), [Viimati vaadatud: 13.05.2014]
<http://navaljourney.com/flat-foot-problem-explained-in-detail-for-indian-armed-forces-aspirants/>
9. Elftman HO 1934. A cinematic study of the distribution of pressure in the

- human foot. Anatomical Record 59 481-90, Juuli 1934.
10. S.M.M. De Rossi, T. Lenzi, N. Vitiello, M. Donati, A. Persichetti, F. Giovacchini, F. Vecchi, M.C. Carrozza, Development of an in-shoe pressure-sensitive device for gait analysis, 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, Boston, Massachusetts USA, August 30 - September 3, 2011, lk 1
 11. Tekscan, MatScan System, [Viimati vaadatud: 13.05.2014]
<http://www.tekscan.com/medical/pressure-sensitive-mat.html>
 12. Go-tec foot plate pressure sensor, Sensor Products, [Viimati vaadatud: 26.05.2014]
<http://www.sensorprod.com/foot-plate-pressure-sensor.php>
 13. Emed- systems, Novel, [Viimati vaadatud: 26.05.2014]
<http://www.novel.de/novelcontent/emed>
 14. FootWork pressure plate, AMcube, [Viimati vaadatud: 26.05.2014]
<http://www.zflomotion.com/gait-analysis-plantar-pressure-measurement-plates/>
 15. Gait analysis, Zebris, [Viimati vaadatud: 26.05.2014]
<http://www.zebris.de/english/medizin/medizin-ganganalyse.php?navanchor=1010045>
 16. Biofoot sensor solutions & benefits, [Viimati vaadatud: 13.05.2014]
http://www.biofoot.com/sensor_foot_2.html
 17. Enrique Alcantara, Javier Gamez, Pedro Perez, Antonio Martinez, Lirios Dueñas, Fail Mode and effects analysis (FMEA) APPLIED TO BIOFOOT/IBV2001 EQUIPMENT ADAPTATION FOR LONG JUMP, ISBS 2002
 18. C.C Weiss, Moticon sensor insoles track your feet for injury and performance, Gizmag,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]
<http://www.gizmag.com/moticon-sensor-insoles/30920/>
 19. RFID Centre, Wireless Standards,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]

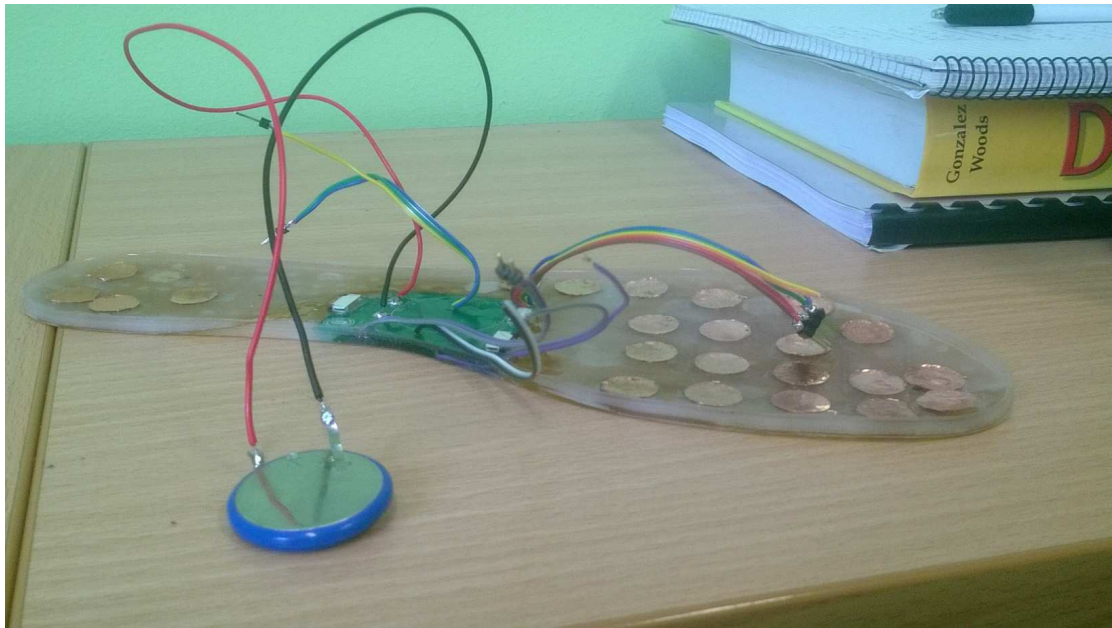
- http://www.rfidc.com/docs/introductiontowireless_standards.htm
20. D. Tonner, “The bluetooth blues”, Information age magazine, 24. mai 2001
21. Bluetooth, Wikipedia,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
22. Bluetooth, History of Bluetooth, [Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://www.bluetooth.com/Pages/History-of-Bluetooth.aspx>
23. ANT, History [Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://www.thisisant.com/company/d/history/>
24. T. Nilsson, Use your Sony Ericsson phone with ANT+ enabled health and fitness products, Sony Developer World, [Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://developer.sonymobile.com/2011/01/06/use-your-sony-ericsson-phone-with-ant-enabled-health-and-fitness-products/>
25. Lou Frenzel, [electronicdesign.com](http://www.electronicdesign.com), What’s The Difference Between Bluetooth Low Energy And ANT? [Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://electronicdesign.com/mobile/what-s-difference-between-bluetooth-low-energy-and-ant>
26. ANT, ANT Message Protocol and Usage,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://www.thisisant.com/resources/ant-message-protocol-and-usage/>
27. Bluetooth, Bluetooth Smart devices list,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Smart-Devices-List.aspx>
28. ANT, Ant+ in phones and tablets,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://www.thisisant.com/consumer/ant-101/ant-in-phones>
29. Ross Miller, engadget, Aptera unveils full specs for its flagship 2e, [Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://www.engadget.com/2009/02/03/aptera-unveils-full-specs-for-its-flagship-2e/#comments>
30. KillaCycle, KillaCycle racing, [Viimati vaadatud: 24.05.2014]
- <http://killacycleracing.com/about-us/killacycle/>

31. Insight SiP, ISP130301 datasheet,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]
http://www.insightsip.com/fichiers_insightsip/pdf/ble/isp_ble_DS130301_R4.pdf
32. LS Research, TiWi-UB2 datasheet,[Viimati vaadatud: 24.05.2014]
<http://www.lsr.com/downloads/products/330-0100.pdf>
33. A. Rüst, M. Gysin, A. Müller, Martin Würms, Simultaneously Connecting Devices through Bluetooth Smart, Embedded World 2014, lk3

Lisad



Lisa1: Sensortalla elektroonika plaat



Lisa 2: Sensortalla prototyyppi, elektronika versioon 0,6

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, _____ Dmitri Grištšenko _____,

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

_____ Materjalitehnoloogia projekti „SOFTSENS“ sensortalla _____

_____ KOMMUNIKATSIOONIMOODULi loomine _____

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on _____ Tarmo Tamm _____,

(juhendaja nimi)

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **29.05.2014**